doi: 10.15940/j.cnki.0001-5245.2024.03.004

DSRT三轴低频天线指向误差批量测量和校正方法*

吐力帕尔·吐鲁洪[1,2,3] 阎敬业[1,2†] 武 林[1,2] 杨 洋[1,2] 蓝爱兰[1,2] 吴 季[1,2]

(1 中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)
(2 中国科学院空间天气学国家重点实验室 北京 100190)
(3 中国科学院大学电子电气与通信工程学院 北京 100049)

摘要 稻城圆环阵太阳射电望远镜(Daocheng Solar Radio Telescope, DSRT)作为子午工程二期太阳-行星际探测子系统的重要部分, 工作在150–450 MHz频段, 可提供高空间、高时间分辨率的太阳爆发亮温图像. 针对DSRT天线的高精度指向测量以及对指向误差批量标定和校正的需求, 首先根据DSRT独有的三轴座架系统, 通过四元数旋转变换法建立了天线3参数编码器零点误差模型; 然后提出了基于射电源的漂移扫描法获得16个单元天线功率方向图, 并根据2维方向图确定波束中心的方法精确测量了DSRT天线指向误差; 最后用最小二乘法拟合得到模型参数, 并通过天线控制软件重新调整各个轴的零点, 后对调整结果进行验证. 结果表明指向校正方法可靠有效, 校正后16个天线的指向精度为0.5°之内, 明显优于校正前3.5°的指向误差, 满足误差小于DSRT天线最高工作频率下的1/10波束范围内的要求.

关键词 射电望远镜: 指向误差, 天线功率方向图; 太阳: 射电, 方法: 数据分析
中图分类号: P111; **文献标识码**: A

1 引言

波束指向精度是射电望远镜天线的重要指标, 理想情况下射电望远镜通过伺服驱动可以精确地跟踪天空中已知位置的射电源, 但是由于天线安装误差、结构刚性、几何缺陷和工作环境等影响, 天线在静态和转动过程中都会存在指向误差, 包括轴系不正交、重力形变、大气折射等因素产生的误差分量. 指向误差的存在不仅会影响天线系统跟踪源的能力, 还会带来天线增益上的损失, 测量和校正指向误差是获取高质量数据的关键步骤之一.

现阶段射电望远镜指向误差的校正多数通过建立指向模型, 用多样本测试拟合模型参数得到校正系数, 再将得到的偏离量补偿到天线伺服控制指令当中[1–2]. 除此之外也可以采用硬件方法校正误差, 如在射电望远镜上安装上小型寻星器或者小型光学望远镜[3–4]. 与基于指向误差模型的校正方法相比, 硬件方法会带来额外的制造和维护成本, 并且局限性较高, 需要保证在视场内至少要有一个恒星, 因此还受到天气因素的影响.

稻城圆环阵太阳射电望远镜(Daocheng Solar Radio Telescope, DSRT)的主要科学目标为太阳活动监测, 兼具全天空射电天文目标的探测能力, 所以在硬件上单元天线设计为赤道仪结合方位向转

2023-02-20收到原稿, 2023-03-16收到修改稿
*国家自然科学基金项目(42004139)、子午工程二期圆环阵太阳射电成像望远镜项目(Y91GJC01)资助
†yanjingye@nssc.ac.cn

台的三轴跟踪策略, 可以组成赤道仪或三轴协同观测全天目标. 常见的射电望远镜指向误差模型是基于赤道仪或经纬仪座架系统, 因此对于DSRT基本参数模型不再适用. DSRT工作在150–450 MHz, 单元天线波束为19.48°–6.49°, 常规微波暗室测量和传统GPS定北等标校方法均存在精度不足和效率过低等问题, 亟需能够实现DSRT系统所有单元天线指向误差批量标定的方法.

为了实现DSRT系统313个低频天线的指向误差的批量标定, 进而提高系统探测性能, 本文以宁静太阳为目标源对DSRT 6 m抛物面圆口径单天线的功率方向图进行测量. 基于DSRT 6 m射电望远镜特有的三轴座架, 创新性地通过四元数旋转变换法推导三轴编码器零点误差模型. 并利用方向图扫描数据, 确定天线指向误差; 然后用最小二乘法得出模型系数, 给出了基于天线2维方向图的单元天线指向误差标定方法, 并结合实际测试数据对指向误差定标方法的有效性进行了验证. 结果表明, 上述方法可以实现DSRT单元天线指向误差的批量测量, 经一轮修正即可将定标残差控制在天线半功率波束宽度的1/10范围内, 为系统探测性能的提升奠定了基础. DSRT的主要技术指标如表1所示.

表 1 DSRT天线阵技术指标
Table 1 Technical specifications of DSRT

Parameter	Specification
Unit antenna aperture	6 m
Number of unit antennas	313
Array configuration	Uniform ring array
Ring diameter	1000 m
Operating frequency	150–450 MHz
Antenna polarization mode	Dual-line polarization

2 天线指向误差测量和校正原理

2.1 基于2维方向图的天线指向误差测量原理

射电望远镜的指向误差可以通过扫描天空中的射电源进行测量, 即观测已知射电源, 测量天线功率方向图, 并通过波束拟合找到波束中心. 扫描方法一般有十字扫描法、五点法等, 但由于天线扫描时天体在空中相对于地面望远镜运动, 对于存在指向误差的天线, 此类方法方向图采样点数过少, 拟合天线波束中心的误差较大. 因此本文提出基于扫描天线2维方向图确定指向误差的方法. 基于射电源测试天线方向图以及指向误差等指标, 要求射电源应具有以下特性: (1)已知精确位置, 能够在一天的变化中覆盖足够的角度范围. (2)角尺寸小, 对于待测天线不可分辨, 可以当成点源. (3)在观测频率范围内具有大的流量密度, 具有足够的信噪比. 当天线扫描一个具有亮温分布$T_{\rm b}(x', y')$的射电源时, 天线温度$T_{\rm A}$是天线的归一化功率方向图与源亮温分布的卷积积分[5], 如(1)式所示:

$$T_{\rm A}(x, y) = \frac{\eta_{\rm R}}{\Omega_{\rm A}} \iint_{4\pi} P(x - x', y - y') T_{\rm b}(x', y') {\rm d}x' {\rm d}y' , \quad (1)$$

其中, x'、y'是相对于源的中心的角度, x、y是相对于天线波束中心的角度, $\eta_{\rm R}$为辐射效率, 以天线欧姆损耗表示, P为归一化功率方向图, $\Omega_{\rm A} = \iint_{4\pi} P{\rm d}\Omega$, 表示天线方向图立体角.

对于角尺寸远小于天线半功率波束宽度(half power beam width, HPBW)的源, 即$\theta_{\rm s} \ll$ HPBW, 源亮温分布$T_{\rm b}$可以近似为δ函数, 其天线扫描即可得出波束形状. 对于均匀分布的圆口径天线, 其半功率波束宽度[6]如(2)式所示,

$$\mathrm{HPBW} = 1.02\frac{\lambda}{D} = 58.442^\circ \frac{\lambda}{D} , \quad (2)$$

其中λ为波长, D为天线口径.

DSRT射电望远镜工作频率在150–450 MHz范围内, 均匀照射时6 m圆口径天线的半功率波束宽度在19.48°–6.49°. 从地球观测太阳的角直径约为32′, 在最高工作频率下, 太阳的角直径占天线半功率波束宽度的7.7%. 一般来说当源角尺寸为天线半功率波束宽度的10%–20%时, 不会对扫描结果带来明显影响[7]. DSRT扫描宁静太阳测试天线方向图时, 可以近似为$\theta_{\rm s} \ll$ HPBW的情况, 这里忽略太阳角宽度所引入的天线方向图的测量误差.

天线方向图测试过程如图1所示, 以宁静太阳为目标源, 源中心理论位置为原点, 沿赤经方向在± 3° (假设天线指向误差不会超过± 3°)的范围内

扫描, 每扫描一次即可获得赤经方向的一维切面. 每完成一次赤经扫描, 赤纬轴固定步进0.5°, 并再次沿赤经方向扫描. 最终得到以太阳理论坐标为原点, 赤经和赤纬方向分别为6°范围内的2维功率方向图. 图1中$(T_{\rm s}, D_{\rm s})$为此刻目标源的赤经赤纬坐标, (T_i, D_i), $i = 0, 1, \cdots, n$为天线扫描时的坐标. 实际DSRT天线扫描宁静太阳和目标源运动轨迹如图2所示, 虚线为天线扫描轨迹; 实线为太阳运动轨迹. 第1次扫描需要先跟踪上目标源, 天线赤纬和目标源赤纬相同, 然后在赤经方向开始扫描, 因此图2中天线扫描轨迹在赤纬方向先正向偏离目标源, 后再负向偏离. 理想情况下, 坐标原点和天线波束中心重合. 而现实情况存在指向误差, 因此天线方向图最大点和零点有偏差.

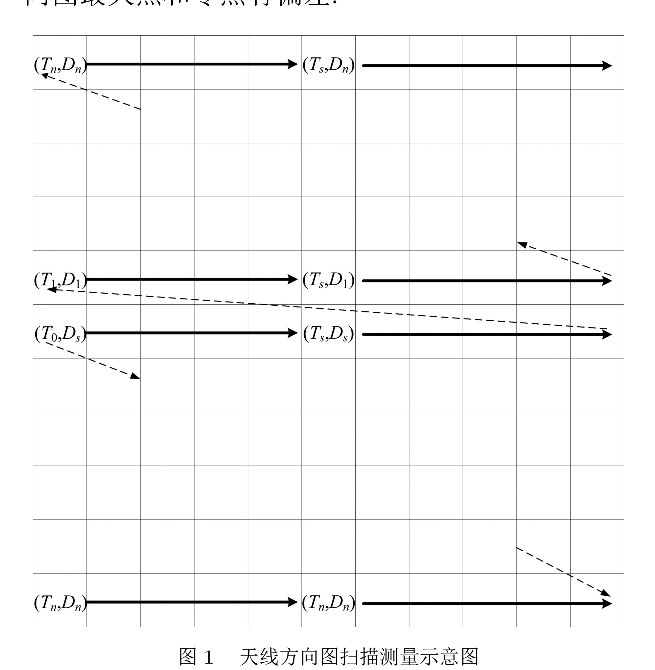


图 1　天线方向图扫描测量示意图

Fig. 1　Schematic diagram of antenna pattern scanning measurement

2.2　天线指向误差修正原理

通过测量天空中已知位置的射电源, 可以建立目标源真实坐标与天线响应最大时的角度编码器读数之间的解析关系, 推导出具有明确物理意义的指向误差模型, 通过多次测量, 求出模型系数, 并在天线控制指令中修正指向误差. 指向误差模型包括了球谐函数模型[8–9]、基本参数模型[2, 10–11]、广义延拓误差修正模型[12]等, 其中基本参数模型具有参数数量较少、物理意义明确、易收敛等特点, 在射电望远镜指向误差校正过程中被广泛采用.

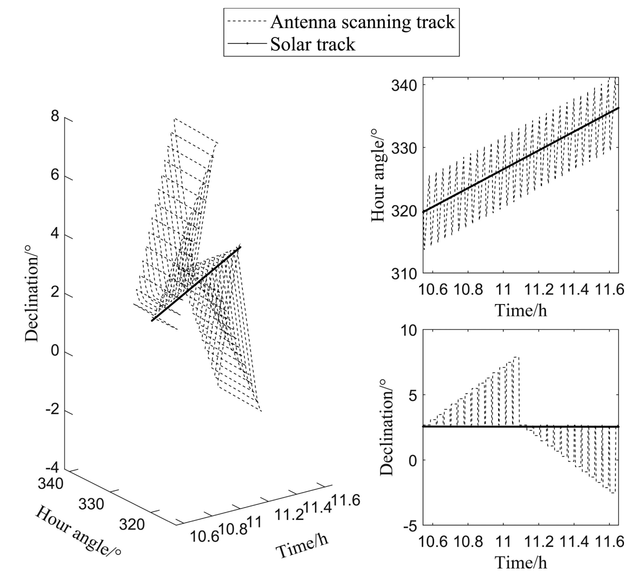


图 2　DSRT天线实际扫描轨迹与射电源轨迹

Fig. 2　DSRT antenna scanning track and radio source track

基本参数模型一般有8个自由参数[13], 如(3)式所示:

$$\begin{cases} \Delta A = P_1 + P_3 \cos A \tan E + P_4 \sin A \tan E + \\ \qquad P_5 \tan E + P_6 \sec E\,, \\ \Delta E = P_2 - P_3 \sin A + P_4 \cos A + P_7 \cos E + \\ \qquad P_8 \cot E\,, \end{cases} \tag{3}$$

其中, A和E分别为天线方位和俯仰角度, ΔA和ΔE分别为方位轴和俯仰轴指向误差, $P_1 \sim P_8$为模型参数. 射电望远镜8参数指向误差模型如表2所示, 该模型分别包括了轴系误差、重力变形和大气折射等误差因素.

DSRT圆环阵天线数量多达313个, 在批量天线安装调试过程中发现, 天线重力变形误差、轴系不正交误差、大气折射误差等均不是主要误差源, 而误差主要来源于天线三轴编码器的零点误差. 本文从工程应用角度出发, 仅考虑天线三轴编码器零点误差对指向误差的影响.

表 2 射电望远镜8参数指向误差模型

Table 2 Pointing error model of 8-parameter for radio telescope

Error parameter	Azimuth correction term	Elevation correction term	Source of error
P_1	1	0	Azimuth encoder offset
P_2	0	1	Elevation encoder offset
P_3	$\cos A\tan E$	$-\sin A$	Azimuth axis offset (E-W)
P_4	$\sin A\tan E$	$\cos A$	Azimuth axis offset (N-S)
P_5	$\tan E$	0	Collimation of mount
P_6	$\sec E$	0	Collimation of beam
P_7	0	$\cos E$	Gravitational bending
P_8	0	$\cot E$	Refraction

3 DSRT天线坐标系和编码器零点指向误差模型

根据DSRT 6 m射电望远镜座架结构, 建立如图3所示的赤道仪时角坐标系(X, Y, Z)与地平坐标系(X_1, Y_1, Z_1); 图中的赤纬角度为D、赤经角度为T、φ为测站的纬度, 指向向量用$\boldsymbol{S}$表示. 两个坐标系均为左手系, 其中X_1轴正向为北, Y_1轴正方向为东, Z_1轴指向天顶, Z轴平行于地球自转轴; 方位角度从北点起按顺时针方向为正, 时角向西为正, 向东为负; 方位轴与Z_1轴重合, 俯仰轴和Y_1轴重合; 赤经轴与Z轴重合, 赤纬轴与Y重合. 在时角与赤纬角度为0°时, 电轴指向与X轴重合.

三维空间上的有限旋转可以用四元数以简便的形式表示[14], 它由3个虚部和一个实部组成, 可写成$\boldsymbol{Q}=a+b\boldsymbol{i}+c\boldsymbol{j}+d\boldsymbol{k}$, 其模长为$\|\boldsymbol{Q}\|=\sqrt{a^2+b^2+c^2+d^2}$, 四元数共轭为$\boldsymbol{Q}^*=a-b\boldsymbol{i}-c\boldsymbol{j}-d\boldsymbol{k}$; 当向量绕转轴$\boldsymbol{u}=(u_x,u_y,u_z)^{\mathrm{T}}$旋转角度$\theta$时, 可以构造四元数表示这一旋转过程, 如(4)式所示.

$$\boldsymbol{Q}=\cos\frac{\theta}{2}+\sin\frac{\theta}{2}u_x\boldsymbol{i}+\sin\frac{\theta}{2}u_y\boldsymbol{j}+\sin\frac{\theta}{2}u_z\boldsymbol{k}\,. \tag{4}$$

任意向量$\boldsymbol{R}$绕以单位向量定义的旋转轴$\boldsymbol{u}$旋转角θ后得到的新向量$\boldsymbol{R}'$可以用3个四元数的乘积表示[15]:

$$\boldsymbol{R}'=\boldsymbol{QRQ}^*=\boldsymbol{QRQ}^{-1}\,, \tag{5}$$

其中$\boldsymbol{Q}$为(4)式所构建的四元数, $\boldsymbol{R}=(0,\boldsymbol{V})$, 为纯四元数, 即实部为0, 虚部为3维向量$\boldsymbol{V}$的空间坐标.

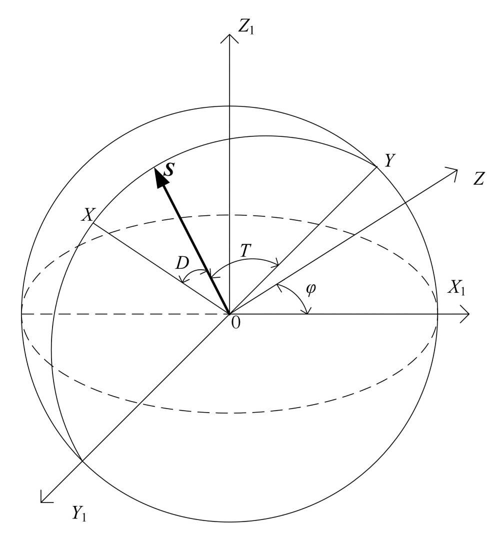


图 3 DSRT天线坐标系示意图

Fig. 3 Schematic diagram of DSRT antenna coordinate system

设望远镜初始指向与X轴重合, 用向量$P_0=[1,0,0]^{\mathrm{T}}$表示, 当没有指向误差时, 天线指向由P_0先绕赤纬轴旋转角度D, 再绕赤经轴旋转角度T指向目标S, 其旋转过程用四元数表示为:

$$\begin{aligned}\boldsymbol{R}_S&=\boldsymbol{R}_t\boldsymbol{R}_\delta\\&=\left(\cos\frac{-T}{2}+\sin\frac{-T}{2}\boldsymbol{k}\right)\left(\cos\frac{D}{2}+\sin\frac{-D}{2}\boldsymbol{j}\right)\,,\end{aligned} \tag{6}$$

$$\boldsymbol{M}_S=\boldsymbol{R}_S\boldsymbol{P}_0\boldsymbol{R}_S{}^{-1}=(\cos D\cos T)\boldsymbol{i}+(-\cos D\sin T)\boldsymbol{j}+(\sin D)\boldsymbol{k}\,, \tag{7}$$

其中, $\boldsymbol{R}_S$为构造的四元数, $\boldsymbol{M}_S$为天线旋转后的指向向量, 由上式可得:

$$\begin{cases}T=\tan^{-1}\left(\dfrac{-\boldsymbol{M}_{S(2)}}{\boldsymbol{M}_{S(1)}}\right),\\ D=\sin^{-1}\boldsymbol{M}_{S(3)}\,,\end{cases} \tag{8}$$

其中, $\boldsymbol{M}_{S(i)}(i=1,2,3)$表示$\boldsymbol{M}_S$的第$i$个分量.

3.1 赤经轴和赤纬轴编码器零点误差

天线轴编码器误差又可以分为刻度误差和零点误差, 刻度误差与天线轴码盘读数成正比, 是由于码盘刻度不精确导致的; 零点误差即当天线指向初始定位方向时, 各轴的编码器零点与真实零点不重合导致的. 当存在三轴的零点误差时, 会影响测量的真实性, 从而影响指向精度. 其中赤经轴与赤纬轴编码器零点误差是天线在0°赤经和0°赤纬定向角度时, 编码器的零点与真实坐标的偏差. 这种码盘零点误差对天线初始安装和调整的要求较高, 通常需要GPS等设备标定每个天线的真地理北方向并储存到编码器. 在天线组成赤道仪系统时, 赤经轴与赤纬轴的编码器零点误差可以用常数项修正.

3.2 方位轴编码器零点误差

DSRT 6 m射电望远镜为三轴系统, 存在水平方向旋转的方位轴, 因此在用赤经和赤纬两轴跟踪时, 通常需要将方位轴转到180°组成赤道仪跟踪天体. 此时如果方位轴存在零点误差, 则相当于是天线指向绕着向量$Z_1=[\cos\varphi,0,\cos(\frac{\pi}{2}-\varphi)]^{\mathrm{T}}$旋转了$\omega$角度, φ为赤经轴与水平面的夹角, 即测站的纬度, 用四元数表示为:

$$\begin{aligned}\boldsymbol{R}_{S1}&=\boldsymbol{R}_\omega\boldsymbol{R}_t\boldsymbol{R}_\delta\\&=\left(\cos\frac{\omega}{2}+\cos\varphi\sin\frac{\omega}{2}\boldsymbol{i}+\sin\varphi\sin\frac{\omega}{2}\boldsymbol{k}\right)\\&\quad\left(\cos\frac{-T}{2}+\sin\frac{-T}{2}\boldsymbol{k}\right)\left(\cos\frac{D}{2}+\sin\frac{-D}{2}\boldsymbol{j}\right),\\ \boldsymbol{M}_{S1}&=\boldsymbol{R}_{S1}\boldsymbol{P}_0\boldsymbol{R}_{S1}^{-1}\end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{aligned}&=[(\cos\varphi\sin\varphi-\cos\omega\cos\varphi\sin\varphi)P_3+\\&(\cos\omega+\cos^2\varphi-\cos\omega\cos^2\varphi)P_1-\\&(\sin\omega\sin\varphi)P_2]\boldsymbol{i}+[P_2\cos\omega-\\&(\sin\omega\cos\varphi)P_3+(\sin\omega\sin\varphi)P_1]\boldsymbol{j}+\\&[(\cos\omega\cos^2\varphi-\cos^2\varphi+1)P_3+\\&(\sin\omega\cos\varphi)P_2+\\&(\cos\varphi\sin\varphi-\cos\omega\cos\varphi\sin\varphi)P_1]\boldsymbol{k}\,,\end{aligned} \tag{10}$$

其中, $\boldsymbol{R}_{S1}$为构造的四元数, $\boldsymbol{M}_{S1}$为天线旋转后的指向向量; P_1、P_2、P_3分别为:

$$\begin{cases}P_1=\cos D\cos T\,,\\ P_2=-\cos D\sin T\,,\\ P_3=\sin D\,.\end{cases} \tag{11}$$

将上式与(8)式中没有指向误差时天线指向向量的表达式进行对比, 整理可得指向误差为:

$$\begin{cases}\Delta T=\omega(\cos\varphi\tan D\cos T-\sin\varphi)\,,\\ \Delta D=-\omega\cos\varphi\sin T\,.\end{cases} \tag{12}$$

3.3 天线编码器零点指向误差模型

传统的基本参数模型中, 天线编码器零点误差只有两个常数项, 而DSRT除了赤经和赤纬转轴外, 还有方位向第三轴, 初始定位坐标为(180°, 0°, 0°)组成赤道仪式座架, 即方位轴指向正南, 赤经轴指向0°赤经, 赤纬轴指向0°赤纬. 因此本文根据DSRT三轴系统的独有特点, 建立了天线3参数编码器零点指向误差模型, 如(13)式所示.

$$\begin{cases}\Delta T=C_1+C_3(\cos\varphi\tan D\cos T-\sin\varphi)\,,\\ \Delta D=C_2-C_3\cos\varphi\sin T\,,\end{cases} \tag{13}$$

上述新建立的3参数模型更符合DSRT三轴系统的实际误差, 其中C_1为赤经轴码盘零点误差, C_2为赤纬轴码盘零点误差, C_3为方位轴码盘零点误差.

3.4 模型拟合

DSRT 6 m天线对宁静太阳进行多次方向图扫描, 通过方向图找出波束中心的赤经和赤纬角度

(T_i', D_i')以及此时刻对应目标源的理论坐标(T_i, D_i), 从而得到天线指向误差$(\Delta T, \Delta D)$.

对于天线主波束-20 dB范围内, 扫描射电源获得的功率方向图可以很好地用2维高斯函数拟合[5], 其高斯拟合曲面如下式所示:

$$f(x,y) = a_1 \exp\left[-\frac{(x-a_2)^2}{2a_3^2} - \frac{(y-a_4)^2}{2a_5^2}\right], \quad (14)$$

式中$a_1 - a_5$为待拟合系数.

图4 (a)和图4 (b)分别为天线漂移扫描获得实测方向图和2维高斯拟合图, 图中的等高线表示功率的归一化强度. 求出系数a_2和a_4作为天线实际的波束中心, 即天线波束中心指向目标源时天线轴编码器的读数; 再计算目标源此刻的理论位置, 可得到天线的赤经和赤纬轴指向误差. 在一天内对目标源进行多次方向图扫描测试, 确定不同时间段的指向误差数据, 再通过最小二乘对指向误差数据进行拟合, 求出天线编码器零点指向误差模型中的$C_1 - C_3$这3个参数, 并对天线的三轴编码器零点进行补偿.

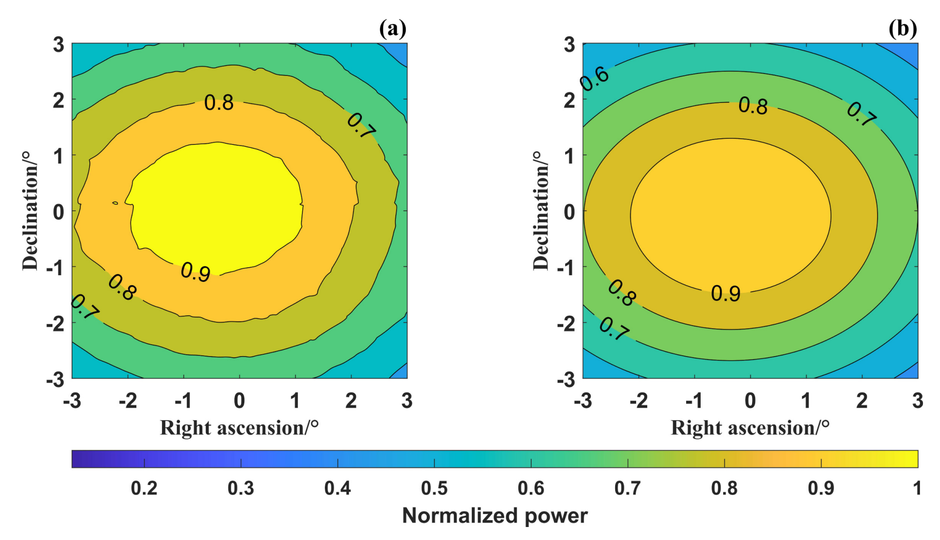


图 4 (a)天线实测方向图. (b)天线高斯拟合方向图.

Fig. 4 (a) Measured antenna pattern. (b) Gaussian fitting antenna pattern.

4 DSRT指向误差测量和修正结果

根据稻城6 m射电望远镜的结构特点, 在实际测试中选择在赤经赤纬平面漂移扫描获得方向图. DSRT系统具有同时记录所有单元天线接收功率的能力, 所以通过批量控制天线进行漂移扫描, 即可获得天线的方向图测量结果, 进而可以利用本文所提出的三轴天线零点校正方法实现DSRT单元天线指向误差的批量高精度校正.

图5为DSRT天线在赤经赤纬平面扫描宁静太阳, 获得的单元天线水平(图5 (a))和垂直(图5 (b))极化通道的立体方向图的实例(445 MHz), 以功率表示.

2022年11月10日北京时间上午9点到下午5点, 对宁静太阳分别进行了13次独立的漂移扫描测试, 16个天线在伺服驱动下以恒定角速度在赤经轴方向扫描, 完成每次扫描后在赤纬轴方向步进. 每次漂移扫描观测时长为30 min, 在源位于不同时角位置共扫描16次, 记录下每次扫描的天线码盘数据以及自相关功率数据, 将天线移动坐标与太阳运动轨迹做差值, 经过数据处理构建了所有天线的2维功率方向图. 图6和图7分别为16个天线指向误差校正前与校正后扫描宁静太阳获得的高斯拟合2维方向图, 图中等高线表示功率的归一化强度, 功率方向图强度最大点为天线波束中心的位置, 波束中心偏

离坐标原点的大小即为天线在赤经和赤纬轴方向的指向误差. 如图6所示, 指向校正前, 所有天线的功率方向图都明显偏离坐标原点, 表明此时天线有较大的指向误差, 经过指向校正后, 如图7所示, 所有天线的功率方向图都在原点附近, 表明天线各轴的指向误差都得到了有效校正; 通过2维高斯拟合定位波束中心, 确定了共16个天线的指向误差, 图8为这16个单元天线赤经和赤纬轴的指向误差随时角的变化趋势, 根据前文建立的三轴指向误差模型可知, 当方位码盘存在零点偏差时, 给天线赤纬轴带来的误差项是关于源时角的函数, 因此图8中多数天线的赤纬轴指向误差随时角而变化. 根据多次漂移扫描获得的天线功率方向图测试数据, 通过最小二乘法解算出这16个天线的3个编码器零点指向误差系数, 并经过天线控制软件补偿三轴的零点误差. 并在2022年11月16日使用所有经过校正后的天线对太阳进行了7次独立的漂移扫描, 确定了校正后的指向误差. 结果表明, 所有天线的指向误差均很好地收敛, 并且通过校正有效抑制了指向误差的方向性变化趋势.

DSRT天线指向误差包括赤经轴误差和赤纬轴误差, 计算参与测试的16个天线各自的赤经轴和赤纬轴指向校正前后的误差均方根(root mean square, rms)值η_T和η_D, 如(15)式所示, 其中m表示指向误差测量次数, ΔT_i表示第i次获得的天线赤经轴指向误差, D_i表示第i次的赤纬角度, ΔD_i表示第i次获得的天线赤纬轴指向误差.

$$\begin{cases} \eta_T = \sqrt{\dfrac{\sum_{i=1}^{m}(\Delta T_i \cos D_i)^2}{m}}, \\ \eta_D = \sqrt{\dfrac{\sum_{i=1}^{m}\Delta D_i^2}{m}}. \end{cases} \tag{15}$$

则每部天线综合指向误差的均方根值用η表示, 如(16)式所示:

$$\eta = \sqrt{\eta_T^2 + \eta_D^2}. \tag{16}$$

图9给出了16个天线的编码器零点误差校正前后的误差均方根值对比, 图9 (a)为赤经轴指向误差的均方根值, 图9 (b)为赤纬轴指向误差的均方根值. 表3给出了这16个单元天线的指向经过校正以后的指向误差的均方根值.

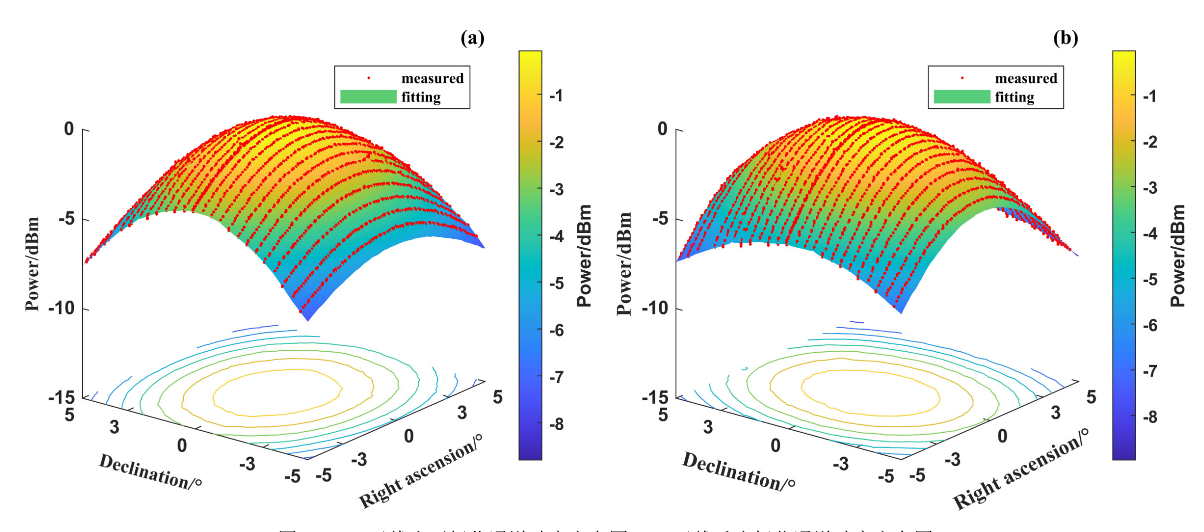


图 5 (a)天线水平极化通道功率方向图. (b)天线垂直极化通道功率方向图.

Fig. 5 (a) Power pattern of antenna horizontal polarization channel. (b) Power pattern of antenna vertical polarization channel.

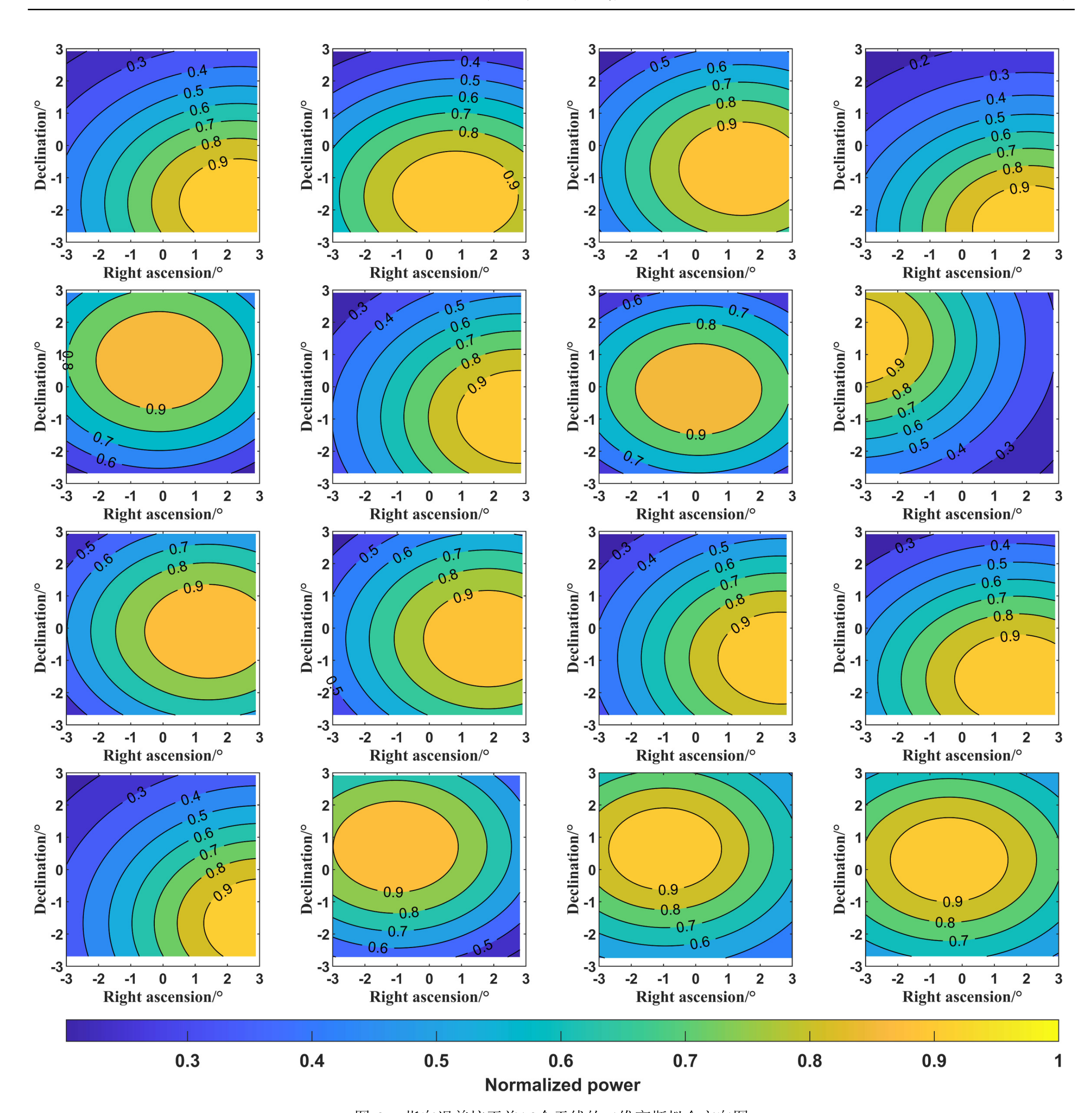


图 6　指向误差校正前16个天线的二维高斯拟合方向图

Fig. 6　2D Gaussian fitting pattern for 16 antennas before pointing error calibration

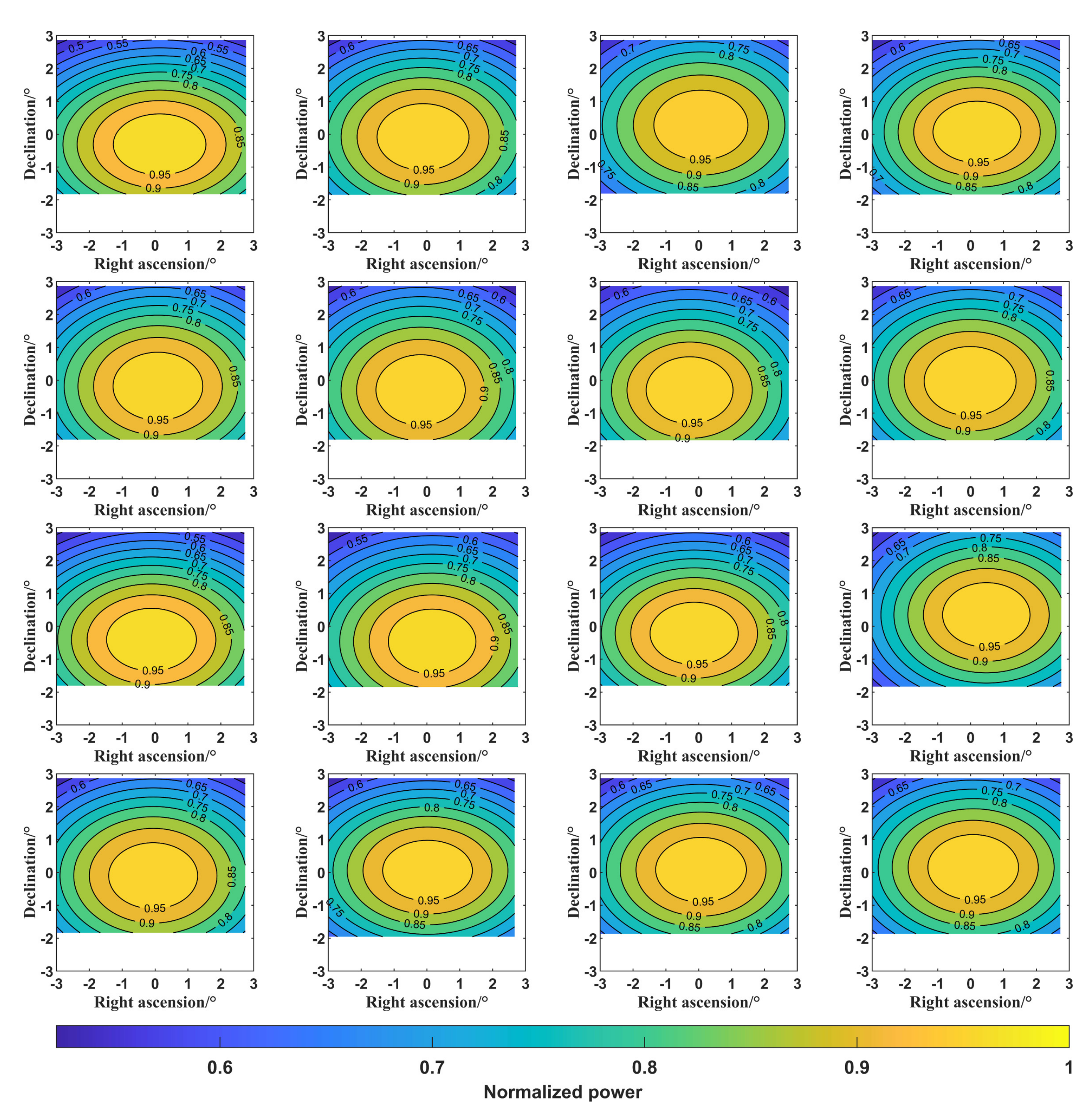


图 7 指向误差校正后16个天线的二维高斯拟合方向图

Fig. 7 2D Gaussian fitting pattern for 16 antennas after pointing error calibration

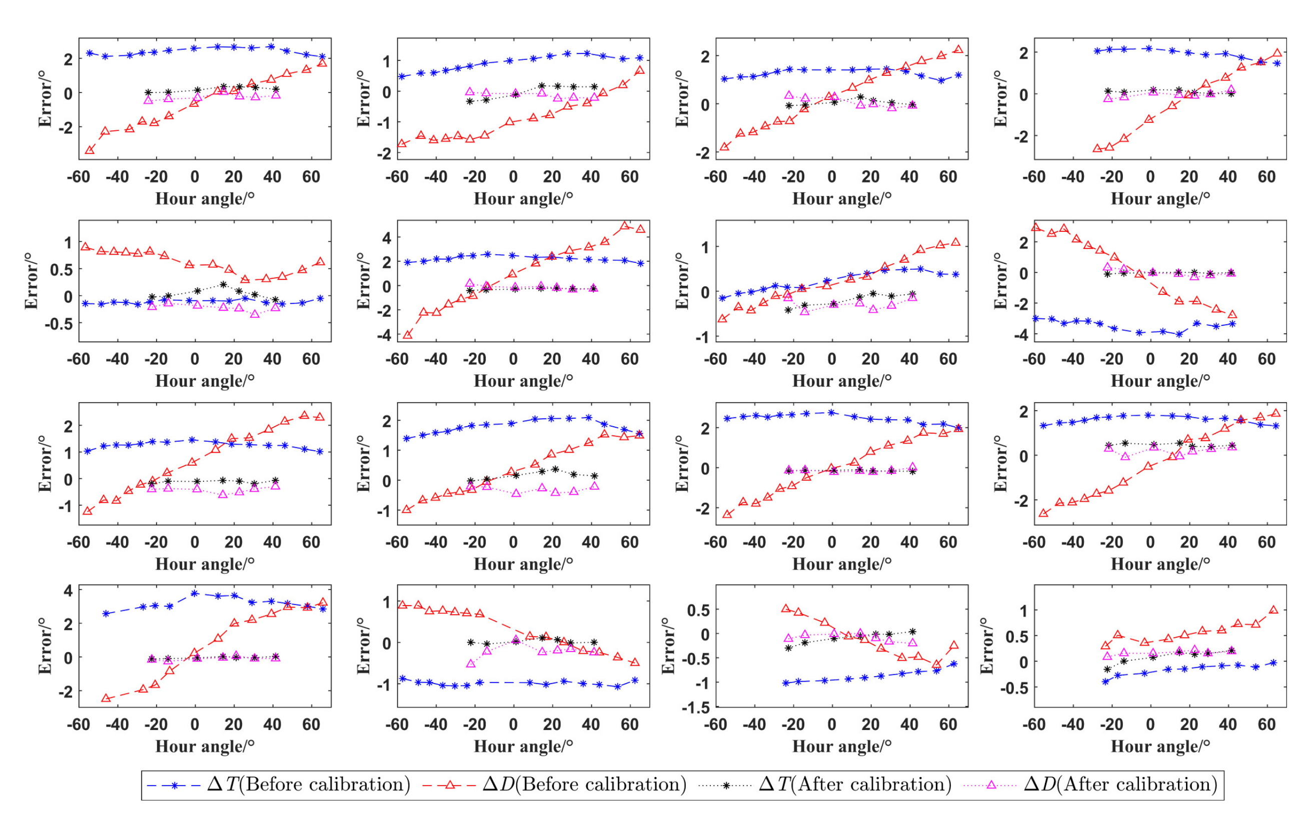


图 8　指向误差校正前后16个天线的赤经和赤纬轴误差的变化趋势

Fig. 8　The variation trend of right ascension axis and declination axis of pointing errors for 16 antennas before and after calibration

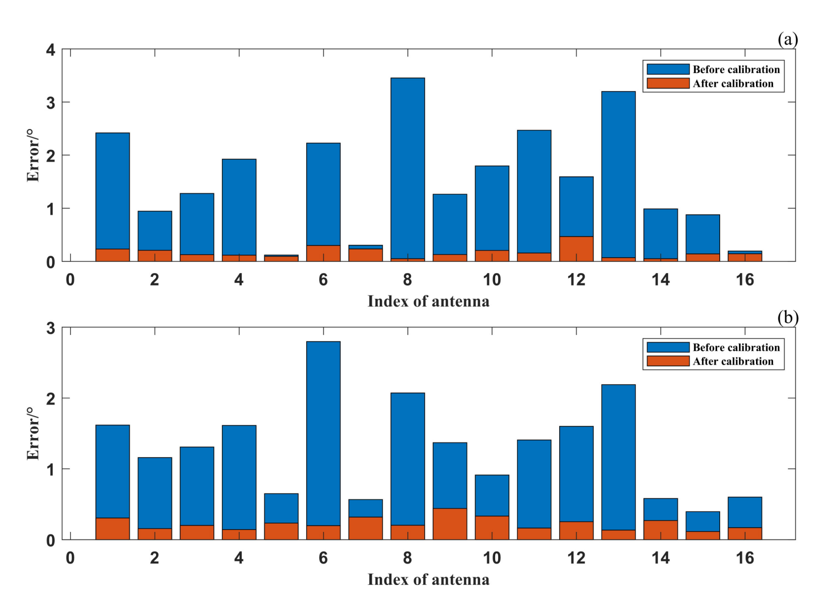


图 9　校正前后天线指向误差的均方根值对比. (a)赤经轴指向误差的均方根值. (b)赤纬轴指向误差的均方根值.

Fig. 9　Comparison of rms errors before and after antenna pointing calibration. (a) rms pointing error of right ascension axis. (b) rms pointing error of declination axis.

表 3 天线指向校正后的指向误差的均方根值
Table 3 Antenna rms pointing error after calibration

Index of antenna	$\eta_T/°$	$\eta_D/°$	$\eta/°$	Index of antenna	$\eta_T/°$	$\eta_D/°$	$\eta/°$
1	0.2330	0.3051	0.3839	9	0.1277	0.4410	0.4591
2	0.2081	0.1563	0.2603	10	0.2066	0.3334	0.3922
3	0.1260	0.2003	0.2367	11	0.1564	0.1625	0.2255
4	0.1161	0.1424	0.1837	12	0.4665	0.2527	0.5306
5	0.0953	0.2344	0.2530	13	0.0689	0.1341	0.1508
6	0.2990	0.1973	0.3582	14	0.0508	0.2705	0.2752
7	0.2342	0.3184	0.3952	15	0.1419	0.1147	0.1824
8	0.0502	0.2025	0.2086	16	0.1441	0.1687	0.2219

5 结论

本文针对DSRT低频射电望远镜三轴座架单元天线存在的指向误差问题, 提出了基于射电源的天线功率方向图漂移扫描方法, 建立了天线三轴编码器零点指向误差模型, 并通过方向图数据计算天线波束中心的指向误差. 实际测试了16个单元天线并校正三轴编码器零点后, 天线指向误差明显收敛在0.5°范围内, 满足天线指向误差小于半功率波束宽度的1/10的要求. 需要指出的是, 选取宁静太阳作为观测源来扫描天线方向图是由于太阳辐射信号较强, 但太阳活动区的赤经赤纬坐标与太阳质心坐标可能并不一致, 因此可能影响指向误差的校正精度. 虽然本方法满足误差小于1/10波束宽度的要求, 但未来仍需研究基于低信噪比天文源进一步提高指向精度的测量方法.

致谢 感谢审稿人对文章提出的宝贵建议, 使得文章的质量有了显著的提高. 感谢ADS数据库的协助. 感谢中国科学院空间天气学国家重点实验室提供的实验条件.

参考文献

[1] Dabiri M T, Hasna M. IEEE Wireless Communications Letters, 2022, 11: 2435
[2] 吴文雅, 马浪明, 姚当, 等. 时间频率学报, 2020, 43: 41
[3] Assawaworrarit S, Padin S. PASP, 2012, 124: 242
[4] Poppi S, Pernechele C, Pisanu T, et al. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2010, 7733: 54
[5] Baars J W M. PhT, 2008, 61: 53
[6] Wilson T L, Rohlfs K, Hüttemeister S, et al. Tools of Radio Astronomy. Sixth edition. Heidelberg: Springer, 2013: 124
[7] Baars J W M. ITAP, 2003, 21: 461
[8] 张晓祥, 吴连大. 天文学报, 2001, 42: 8
[9] Zhang X X, Wu L D. ChA&A, 2001, 25: 499
[10] 马小辉, 张志斌, 孙中苗, 等. 天文学报, 2021, 62: 12
[11] 孙正雄, 王锦清, 虞林峰, 等. 天文研究与技术, 2023, 20: 24
[12] 孔德庆, 施浒立, 张喜镇, 等. 西安电子科技大学学报, 2008, 35: 157
[13] Wang Y, Lou Z, Zuo Y X, et al. RAA, 2020, 20: 54
[14] Cariow A, Cariowa G, Majorkowska-Mech D. International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, 2020, 30: 149
[15] 盛广润, 高国伟, 张伯源. 现代电子技术, 2020, 43: 6

Batch Measurement and Calibration Method of DSRT Three-axis Low Frequency Antenna Pointing Error

TULPAR Turgun[1,2,3] YAN Jing-ye[1,2] WU Lin[1,2] YANG Yang[1,2] LAN Ai-lan[1,2] WU Ji[1,2]

(1 National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)
(2 State Key Laboratory of Space Weather, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)
(3 School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract Daocheng Solar Radio Telescope (DSRT) is an important part of the Solar Interplanetary exploration subsystem of the second phase of The Chinese Meridian Project. It operates in the 150 MHz to 450 MHz frequency band and provides high-resolution spatial and temporal images of solar eruption brightness and temperature. Aiming at the high precision pointing measurement of the DSRT antenna and the requirement of batch calibration and correction of pointing errors, this paper establishes the 3-parameter, antenna encoder zero point offset pointing error model by quaternion rotation transformation method according to the unique three-axis mount system of DSRT. In this paper, the drift scanning method based on radio source is proposed to obtain the radiation pattern of 16 antennas and determine the boresight according to the two-dimensional power pattern to accurately measure the pointing error of the DSRT antenna. Finally, the least square method is used to get the model parameters, and the antenna control software is used to adjust the encoder zero point of each axis, and then the adjustment results are verified. The results show that the pointing calibration method is reliable and effective. The pointing accuracy of 16 antennas after correction is within 0.5°, which is significantly better than the pointing error of 3.5° before calibration, and the error is less than one-tenth of HBPW (half power beam width) under the maximum working frequency of the DSRT antenna.

Key words radio telescope: pointing error, antenna power pattern; sun: radio radiation, methods: data analysis